Politechnika Warszawska

WYDZIAŁ MATEMATYKI
I NAUK INFORMACYJNYCH

# Praca dyplomowa inżynierska

na kierunku Informatyka

Interfejs użytkownika do manualnego obrysu struktur oraz wybranych anormalności w obrazach medycznych z wykorzystaniem tabletu graficznego

Łukasz Garstecki

Numer albumu 276857

Tomasz Świerczewski

Numer albumu 276915

promotor

dr inż. Magdalena Jasionowska

WARSZAWA 2019

.....

podpis promotora

.....

podpisy autorów

**Streszczenie**

Interfejs użytkownika do manualnego obrysu struktur oraz wybranych anormalności w obrazach medycznych z wykorzystaniem tabletu graficznego

Przykładowe streszczenie. Do wykonania jako ostatnie.

**Słowa kluczowe:** slowo1, slowo2, ...

**Abstract**

English title

Sample abstract in english.

**Keywords:** keyword1, keyword2, ...

Warszawa, dnia .....

Oświadczenie

Oświadczam, że moją część pracy inżynierskiej (zgodnie z podziałem zadań opisanym na wstępie) pod tytułem „Interfejs użytkownika do manualnego obrysu struktur oraz wybranych anormalności w obrazach medycznych z wykorzystaniem tabletu graficznego", której promotorem jest dr inż. Magdalena Jasionowska, wykonałem samodzielnie, co poświadczam własnoręcznym podpisem.

.....

# Spis treści

# Wstęp

O czym jest praca? Co się w niej znajduje? Jaki jest wkład autora?

# 1. Wprowadzenie

## 1.1. Zagdanienia medyczne związane z aplikacją

## 1.2. Podział prac

# 2. Stan wiedzy

W poniższym rozdziale zostały przedstawione istniejące na rynku aplikacje oferujące podobne funkcjonalności do wymagań postawionych przed autorskim systemem do obrysów na obrazach DICOM. Przedstawiono również proponowane rozwiązanie postawionych przed systemem wymagań.

## 2.1. Przegląd istniejących rozwiązań

### 2.1.1. Cornerstone

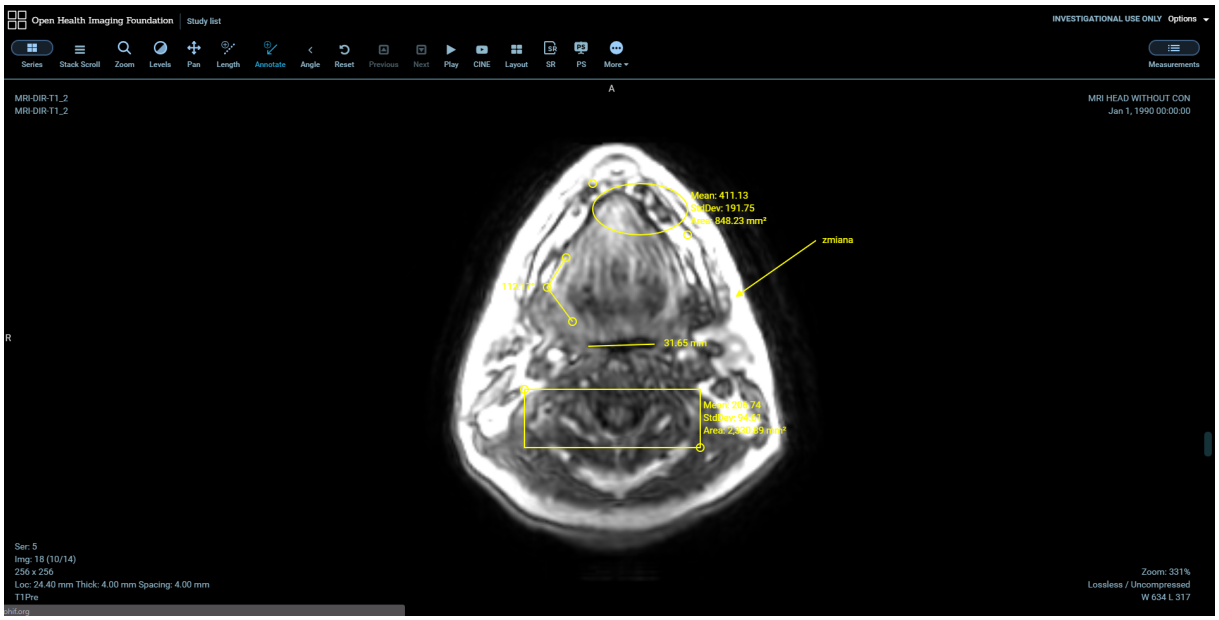
Cornerstone Core to biblioteka, która umożliwia wyświetlanie obrazów medycznych z wykorzystaniem elementu canvas z języka HTML5. Biblioteka udostępnia interfejs do wyświetlania obrazów medycznych pozwalający na zarządzanie wyświetlaniem zdjęcia. Podstawowe funkcjonalności obsługiwane przez bibliotekę to:

- Przybliżanie i oddalanie obrazu,
- Obrót obrazu,
- Przesuwanie obrazu w wyświetlanym komponencie,
- Zmiana jasności wyświetlanego obrazu,
- Mapowanie kolorów,
- Interpolacja pikseli w obrazie (dla obrazów o niskiej rozdzielczości).

Ponadto twórcy biblioteki Cornerstone Core stworzyli bibliotekę Cornerstone Tools, która korzysta z biblioteki Cornerstone Core i umożliwia wiele funkcjonalności potrzebnych lekarzom do analizy badań pacjentów. Poza funkcjonalnościami Cornerstone Core umożliwia także:

- Mierzenie odległości w linii prostej na obrazie z podaniem rzeczywistych wartości,
- Oznaczanie obszarów przy pomocy prostokątów oraz elips,
- Oznaczanie niewielkich zmian w postaci małego okręgu,
- Mierzenie kątów na podstawie 3 podanych przez użytkownika punktów.

Przykładowym projektem korzystającym z bibliotek Cornerstone jest OHIF Viewer. Aplikacja pozwala na wykorzystanie większości możliwości udostępnianych przez biblioteki Cornerstone. Przykładowe użycie aplikacji zostało przedstawione na rysunku 2.1.




Rysunek 2.1: Przykład użycia aplikacji OHIF Viewer

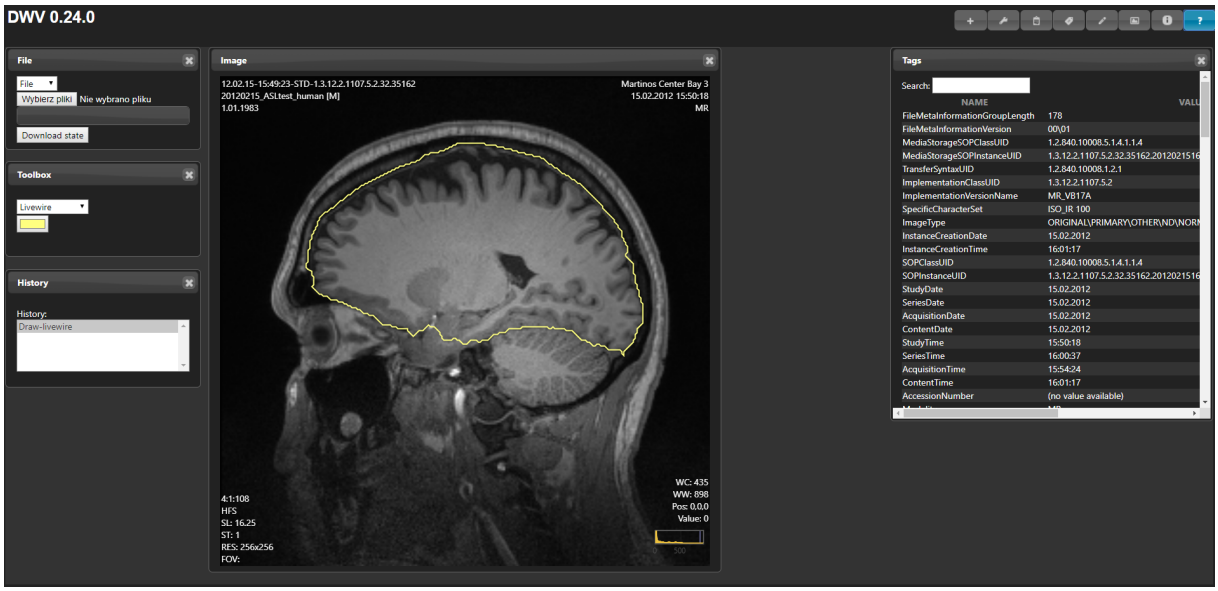
### 2.1.2. DICOM Web Viewer (DWV)

Aplikacja DWV jest również przykładem aplikacji przeglądarkowej służącej do przeglądania obrazów DICOM z wygodnym interfejsem automatycznego i półautomatycznego obrysowywania interesujących użytkownika obszarów zaznaczonych na obrazie. Przykładowy obrys wykonany przy użyciu aplikacji DWV przedstawiono na rysunku 2.2.

Poza tym aplikacja udostępnia:

- Przybliżanie i oddalanie obrazu,
- Przesuwanie obrazu w wyświetlanym komponencie,
- Zmiana jasności wyświetlanego obrazu,
- Mierzenie odległości w linii prostej na obrazie z podaniem rzeczywistych wartości,
- Oznaczanie obszarów przy pomocy prostokątów oraz elips.

Niestety aplikacja nie pozwala na wykonywanie manualnych obrysów poprzez samodzielne poruszanie kursorem po obrazie.

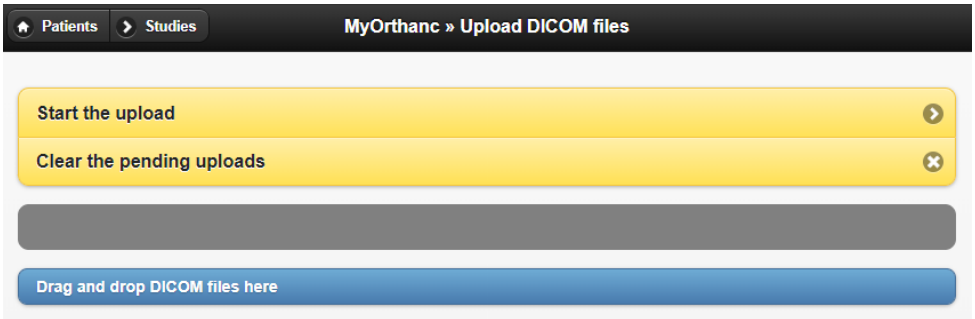



Rysunek 2.2: Przykład użycia aplikacji DWV - obrys półautomatyczny (Livewire)

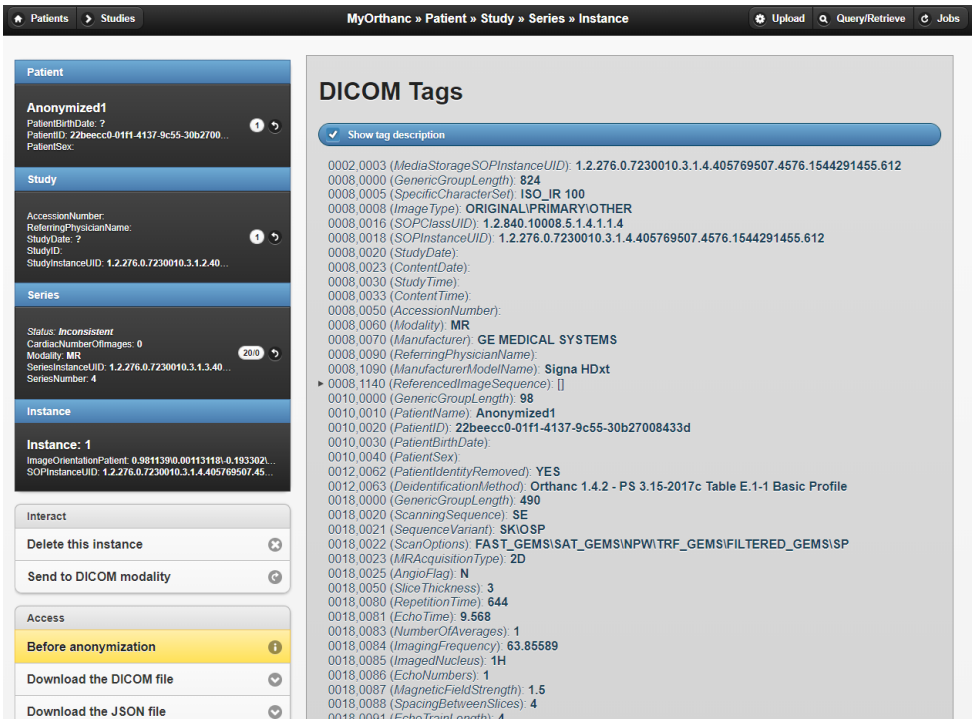
### 2.1.3. Orthanc

Orthanc to serwer z bazą plików DICOM, który umożliwia łatwe przechowywanie, zarządzanie oraz dostęp do plików medycznych DICOM. Ponadto Orthanc udostępnia REST API, które umożliwia przeglądanie wgranych na serwer plików DICOM podzielonych względem pacjentów, badań i serii.

Serwer Orthanc udostępnia również prosty interfejs przeglądarkowy, który pozwala na wgrywanie nowych plików (interfejs wgrywania plików przedstawiono na rysunku 2.3), przeglądanie zapisanych plików — w szczególności tagów (rysunek 2.4) oraz podglądu obrazu (rysunek 2.5). Interfejs przeglądarkowy nie zapewnia żadnej metody rysowania na przeglądanym obrazie. Pozwala natomiast na przełączanie obrazu na kolejny przez kliknięcie lewym przyciskiem myszy w prawą część podglądu obrazu.




Rysunek 2.3: Interfejs wgrywania plików DICOM do serwera Orthanc




Rysunek 2.4: Podgląd tagów pliku DICOM przez interfejs przeglądarkowy Orthanc

### 2.1.4. Podsumowanie

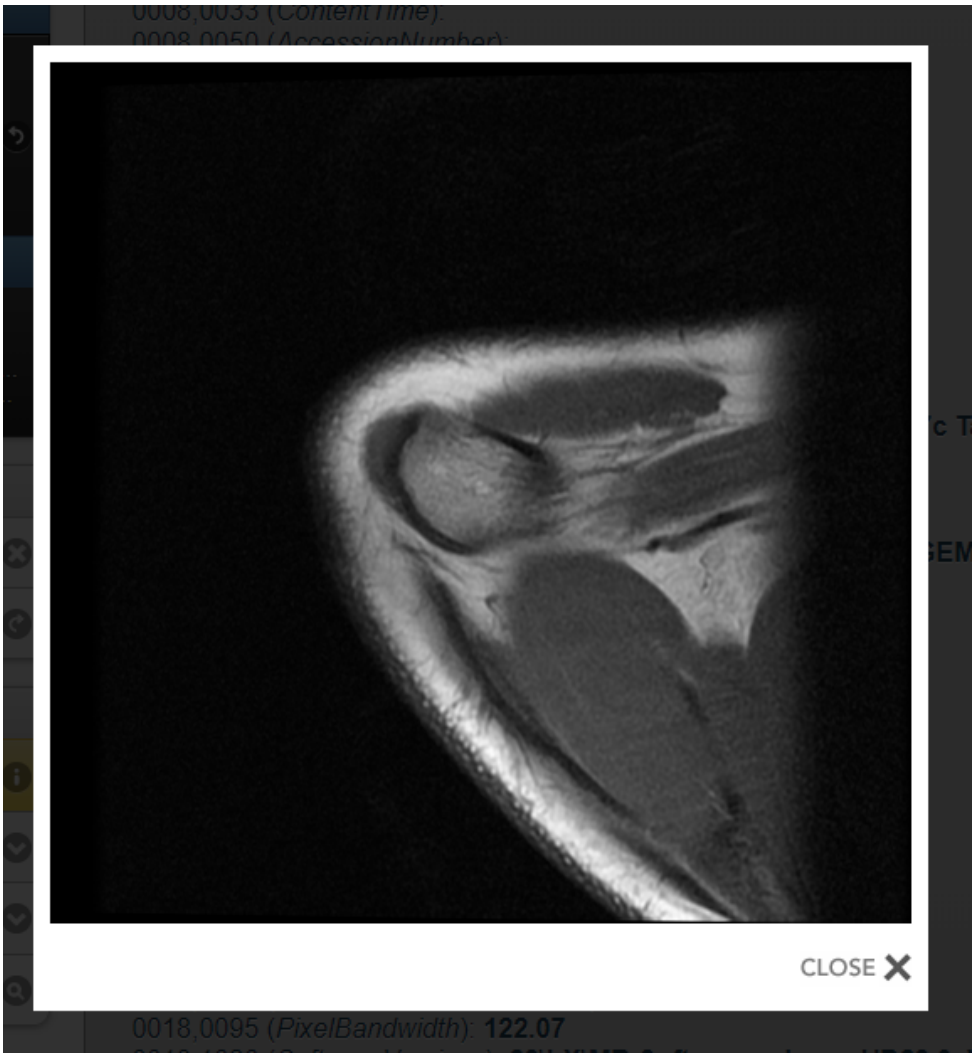
## 2.2. Proponowane rozwiązanie

Istniejące rozwiązania nie zapewniają wygodnego interfejsu użytkownikowi, który dysponuje tabletem graficznym i chciałby obrysowywać interesujące go części obrazów medycznych odręcznie. Ponadto żadne z narzędzi nie przechowuje narysowanych i wygenerowanych wcześniej obrysów. Rozwiązanie przedstawione w tej pracy udostępnia takie możliwości.

W rozwiązaniu zdecydowano się skorzystać z serwera Orthanc jako bazy przechowującej pliki DICOM. Przy decyzji miały znaczenie przede wszystkim to, że większość ośrodków naukowych oraz medycznych korzysta z tego serwera. Ponadto udostępniane przez API serwera funkcjonalności są wystarczające dla realizowanego systemu.

Poza serwerem Orthanc stworzono serwer w technologii .NET Core wspomagający interfejs użytkownika, który pozwala na przeprowadzanie czasochłonnych aplikacji poza interfejsem użytkownika. Podstawowymi zadaniami tego serwera było przechowywanie wykonanych przez użytkownika obrysów manualnych, generowanie i przechowywanie obrysów półautomatycznych oraz obliczanie statystyk związanych z zapisanymi obrysami.

Jako interfejs użytkownika wykorzystano bibliotekę ReactJS w połączeniu z biblioteką Redux. Wybranie tej technologii pozwoliło na stworzenie eleganckiej aplikacji przeglądarkowej pozwala-




Rysunek 2.5: Podgląd obrazu DICOM przez interfejs przeglądarkowy Orthanc

jącej na generowanie obrysów manualnych przy użyciu myszy lub tabletu graficznego, wybieranie punktów, z których generowane będą obrysy półautomatyczne, oglądanie wcześniej wygenerowanych i zapisanych obrysów oraz wyświetlanie statystyk dotyczących wykonanego obrysu. Interfejs inspirowany jest podglądem obrazu w aplikacji DWV, ale funkcjonalność automatycznego obrysu została zmieniona — obrys nie jest generowany na bieżąco, lecz na życzenie użytkownika wybrane przez niego punkty wysyłane są do serwera i wyświetlany jest wynik półautomatycznego dopasowania obrysu.

# 3. Opis autorskiego systemu informatycznego

W poniższym rozdziale zawarto dokumentację techniczną i biznesową tworzonego systemu. Przedstawiono w szczególności: wymagania, architekturę, zastosowane metody półautomatycznego obrysu oraz metody obliczania statystyk obrysu.

## 3.1. Specyfikacja wymagań

Przed stworzeniem systemu zostały zgromadzone dane dotyczące wymagań stawianych przed tworzonym systemem. Zostały one przedstawione w postaci zgodnej z wymaganiami stawianymi w inżynierii oprogramowania w rozdziałach 3.1.1. - 3.1.3. Wymagania były gromadzone na podstawie informacji przekazywanych przez opiekuna naukowego tej pracy dyplomowej i wywiadu wśród lekarzy i studentów Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego.

### 3.1.1. Opis biznesowy

Celem projektu jest stworzenie interfejsu przyjaznego użytkownikowi, który umożliwi przeglądanie plików DICOM, a także przeprowadzanie na tych plikach obrysów. Prace obejmują stworzenie aplikacji webowej, która udostępni użytkownikowi interfejs komunikujący się z bazą danych Orthanc oraz serwera odpowiedzialnego za przechowywanie wygenerowanych przez użytkownika obrysów oraz wyznaczanie obrysów półautomatycznych.

Do podstawowych funkcjonalności systemu zaliczają się:

- Generowanie obrysu manualnego.
- Generowanie obrysu półautomatycznego na podstawie punktów wybranych przez użytkownika.
- Zapisywanie wygenerowanych obrysów.
- **Anonimizacja**[1] danych zapisanych w strukturze pliku DICOM.

[1] Anonimizacja (ang. anonymization) — operacja mająca na celu usunięcie z danych informacji o pacjentach, które pozwoliłyby na identyfikację danych z tożsamością pacjenta. Są to między innymi: imiona, nazwisko, pesel. Inne tłumaczenia słowa anonymization — utajnianie, usuwanie danych niejawnych. Z uwagę na fakt, że te

### 3.1.2. Wymagania funkcjonalne

Nieodłącznym elementem inżynierii oprogramowania przy próbie dokumentacji określonego produktu lub usługi, są wymagania funkcjonalne i niefunkcjonalne. Te pierwsze opisują funkcje i możliwości, które system powinien realizować. Zostały przygotowane wymagania funkcjonalne dla tworzonego systemu. Zostały one przedstawione w postaci historii użytkownika (ang. user stories), czyli czynności jakie może chcieć wykonać użykownik tego systemu:

1. **Jako użytkownik chcę wczytać obraz DICOM.**
   Użytkownik może wybrać obraz w menu bocznym, w którym ma możliwość wyboru pacjenta, badania oraz serii. Wybranie serii skutkuje wyświetleniem pierwszego obrazu DICOM z tej serii.

2. **Jako użytkownik chcę zmienić obraz w serii przy użyciu rolki myszy.**
   Po umieszczenie kursora na obrazie przewijanie rolką myszy do góry powoduje zmianę wyświetlanego obrazu na kolejny obraz w serii. Gdy przewijamy rolką myszy do góry na ostatnim obrazie w serii wyświetlany obraz nie zmienia się. Analogicznie przewijanie rolką myszy w dół powoduje zmianę wyświetlanego obrazu na poprzedni obraz w serii, a przewijanie w dół rolką myszy na pierwszym obrazie w serii nie powoduje zmiany obrazu.

3. **Jako użytkownik chcę wykonać obrys przy użyciu tabletu graficznego.**
   Po umieszczenie kursora na obrazie sterowanym przez tablet graficzny, użytkownik prowadzi kursor po obrazie wykonując obrys bez odrywania końcówki rysika od podkładki. Jeżeli użytkownik nie zakończy obrysu dokładnie w punkcie, w którym go rozpoczął, obrys powinien zakończyć się linią prostą, łączącą punkt końcowy z punktem początkowym.

4. **Jako użytkownik chcę wygenerować obrys na podstawie wybranych punktów.**
   Po umieszczenie kursora na obrazie użytkownik może wybierać punkty, na podstawie których zostanie wygenerowany obrys, poprzez wciśnięcie lewego przycisku myszy w miejscach, w których chce, aby znalazły się punkty. Użytkownik może zobaczyć efekt wygenerowanego przez system obrysu.

5. **Jako użytkownik chcę edytować listę punktów, z której wygenerowany zostanie obrys.**
   Użytkownik może usunąć wcześniej wybrany punkt po umieszczając nad nim kursor i wciśnięciu lewego przycisku myszy. Użytkownik może dodać nowy punkt do listy punktów poprzez wciśnięcie lewego przycisku myszy w miejscu, w którym chce wstawić punkt.

tłumaczenia nie oddają dobrze kontekstu, zastosowano kalkę językową.

6. **Jako użytkownik chcę wybrać kolor obrysu.**
   Użytkownik wybiera kolor z palety kolorów lub może zdefiniować własny kolor poprzez podanie kodu RGB koloru, który chce wybrać.

7. **Jako użytkownik chcę zapisać obrys.**
   Po wykonaniu obrysu manualnego lub wybraniu listy punktów do wygenerowania obrysu półautomatycznego, użytkownik wybiera nazwę obrysu i zapisuje obrys w systemie.

8. **Jako użytkownik chcę obejrzeć zapisany obrys.**
   Użytkownik wybiera z listy po prawej stronie zapisany obrys i przegląda obrys naniesiony na obraz, na którym został wykonany.

9. **Jako użytkownik chcę zobaczyć statystyki dotyczące obrysu.**
   Użytkownik wybiera z listy po prawej stronie zapisany obrys i przegląda statystyki obliczone na podstawie zapisanego obrysu. Do statystyk zalicza się obwód obrysu, pole obrysu, histogram obrazu na obszarze obrysu oraz liczba pikseli wewnątrz obrysu.

10. **Jako użytkownik chcę zobaczyć jednocześnie dowolną liczbę zapisanych w systemie obrysów na jednym obrazie DICOM.**
    Użytkownik wybiera poprzez kliknięcie lewym przyciskiem myszy na nazwie obrysu znajdującej się na liście po prawej stronie. Wybrane obrysy wyświetlane są jednocześnie na przeglądanym przez użytkownika zdjęciu. Użytkownik może wyłączyć podgląd wcześniej wybranego obrysu poprzez ponowne wciśnięcie lewego przycisku myszy na nazwie obrysu na liście po prawej stronie. Na zdjęciu wyświetlane są jedynie obrysy wykonane na tym obrazie.

11. **Jako użytkownik chcę zanonimizować dane pacjenta zawarte w pliku DICOM.**
    Użytkownik może zanonimizować pacjenta, gdy przegląda jego obraz. Użytkownik może anonimizować imię i nazwisko pacjenta, datę urodzenia pacjenta oraz płeć pacjenta poprzez nadanie nowych wartości lub poprzez usunięcie poprzedniej wartości i pozostawienie pustych pól w formularzu.

### 3.1.3. Wymagania niefunkcjonalne

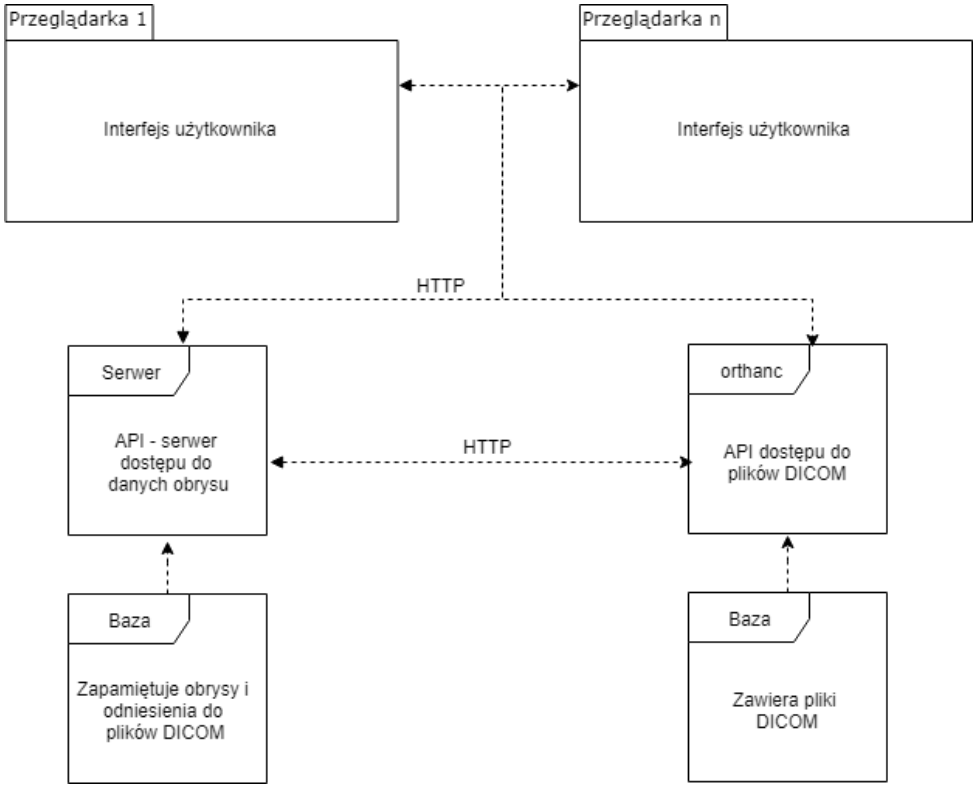
Drugim rodzajem wymagań są wymagania niefunkcjonalne. Opisują one kryteria osądzania działania systemu pod kątem jakościowym. Założone wymagania niefunkcjonalne zostały przedstawione w Tabeli 3.1.

Tablica 3.1: Spis wymagań niefunkcjonalnych

| Obszar wymagań | Nr wymagania | Opis |
|---|---|---|
| Użyteczność (ang. Usability) | 1 | Każda funkcjonalność aplikacji dostępna dla użytkownika musi mieścić się na pojedynczym ekranie przy rozdzielczości 1920x1080 i czcionce nie mniejszej niż 12pt. |
| | 2 | Aplikacja powinna udostępniać pobranie zapisanych obrysów przy użyciu serwisu REST. |
| Niezawodność (ang. Reliability) | 3 | Aplikacja ma być dostępna 24h w ciągu doby. Dopuszczalny jest brak działania aplikacji w dowolnym momencie przez okres nie dłuższy niż przez 12h. Po przerwie w działaniu aplikacja musi być dostępna przez kolejne 24h bez utrudnień. |
| Wydajność (ang. Performance) | 4 | Aplikacja powinna pobierać dane zewnętrzne w postaci pliku DICOM (około 20MB) nie dłużej niż 5 sekund. |
| | 5 | Aplikacja powinna generować obrys półautomatyczny i zapisywać obrys do systemu w czasie nie dłuższym niż 30 sekund. |
| | 6 | Aplikacja powinna reagować na działanie użytkownika (z wyłączeniem generowania obrysu półautomatycznego i zapisu obrysu do systemu) w czasie nie dłuższym niż 1 sekunda. |

## 3.2. Architektura rozwiązania

Na rysunku 3.1 przedstawiono architekturę autorskiego systemu.




Rysunek 3.1: Diiagram UML przedstawiający architekturę autorskiego systemu

Architektura pozwala na połączenie z serwerem plików DICOM (Orthanc) oraz serwerem obrysów dowolnej liczby klientów korzystających z przeglądarki. Algorytmy zapisu obrysu, generowania obrysu, obliczania statystyk oraz anonimizacji plików są od siebie niezależne i mogą zostać zrównoleglone — ograniczeniem jest tutaj moc obliczeniowa maszyny na której uruchomiony jest serwer. Niemożliwe jest zwiększenie wydajności poprzez zwiększenie liczby instancji serwera. Dopuszczalne jest takie rozwiązanie, gdyż planowana liczba użytkowników jednocześnie korzystających z aplikacji to nie więcej niż 20 osób. Możliwości zwiększenia skalowalności w kontekście obliczeniowej zostało opisane w rozdziale 5.2.

### 3.2.1. Interfejs użytkownika

Kluczowym elementem stworzonego systemu jest interfejs użytkownika napisany w języku skryptowym JavaScript przy użyciu biblioteki ReactJS. Udostępnia ona interfejs nawigujący po zapisanych w serwerze Orthanc plikach DICOM. Ponadto dla wyświetlonego obrazu udostępnia szczegóły dotyczące obrazu, badania i pacjenta. Umożliwia także wykonanie obrysu manualnego

zrealizowanego przy użyciu biblioteki react-canvas-draw. W aplikacji zawarto również autorski interfejs do wyboru punktów do algorytmu półautomatycznego. Podgląd zapisanych w systemie obrysów wraz z wyliczonymi dla nich statystykami jest możliwy z poziomu tworzenia obrysów oraz w osobnej zakładce udostępniono widok, w którym użytkownik może oglądać wybrane przez siebie obrysy z listy obrysów jednocześnie na jednym obrazie.

### 3.2.2. Serwer obrysów i obliczeń

Kolejny kluczowy element stworzonego systemu to serwer obrysów i obliczeń. Udostępnia on API z obrysami, które zostało wykorzystane przez interfejs użytkownika. API zostało stworzone przy pomocy ASP.NET Core 2.2 [17] przy wykorzystaniu frameworka .NET Core 2.2 [3]. API oferuje 4 podstawowe operacje CRUD - utwórz, odczytaj, aktualizuj i usuń. W celu pobrania zdjęć medycznych serwer z API łączy się do bazy danych Orthanc. Informacje o obrysach, takie jak ID obrysu, tag, ID obrazu medycznego i typ obrysu (półautomatyczny lub manualny) są przechowywane w bazie danych Microsoft SQL Server. Pozostałe informacje, takie jak lista pikseli należących do obrysu, lista punktów w przypadku obrysu półautomatycznego i statystyki są przechowywane w plikach CSV. Te pliki są zapisywane w katalogu roboczym obok miejsca przechowywania plików źródłowych dla API.

## 3.3. Opracowany algorytm półautomatyczny

Opracowany algorytm półautomatyczny służy do wykrywania krawędzi na obrazie medycznym. Jest algorytmem półautomatycznym, ponieważ jest wspomagany przez człowieka — użytkownika, który wybiera punkty na ekranie. Te punkty są interpolowane przez algorytm półautomatyczny, zwany dalej algorytmem.

Jako dane wejściowe do algorytmu uzyskujemy następujące informacje:

- Identyfikator obrazu medycznego, na którym był wykonywany obrys.
- Lista punktów wybranych przez użytkownika. Punkty te zostały wcześniej przeskalowane ze współrzędnych w aplikacji internetowej (aplikacji webowej, ang. web application) na współrzędne odpowiadające rozdzielczości obrazu medycznego.

Algorytm można podzielić na kilka ważnych etapów:

- Wykrycie krawędzi na bitmapie,
- Stworzenie grafu z bitmapy,
- Zapewnienie spójności grafu,

- Wyszukanie najkrótszych ścieżek w grafie.

Poniżej zostaną przedstawione dokładne rozwiązania dla każdego z tych kroków. Przed rozpoczęciem przetwarzania jest pobierany obraz medyczny o danym wcześniej identyfikatorze ze serwera Orthanc. Jest on podstawą do dalszej pracy algorytmu.

### 3.3.1. Wykrycie krawędzi na bitmapie

Często na obrazach medycznych różnice w charakterystyce poziomów szarości pikseli reprezentujących interesujące nas obiekty są małe, nie są dane dodatkowe informacje o naturze obrazu. Problem opracowania uniwersalnego algorytmu wykrywania krawędzi jest problemem trudnym. Dla wielu algorytmów można znaleźć takie przykłady, że te algorytmy nie wyznaczą poprawnie krawędzi. Te algorytmy muszą spełniać szereg wymagań, które stwierdzają poprawność danego algorytmu, czy też operatora morfologicznego. Zgodnie z [4] „dobry detektor krawędzi powinien spełniać następujące warunki:

- niskie prawdopodobieństwo zaznaczenia punktów nienależących do krawędzi oraz niskie prawdopodobieństwo niezaznaczenia punktów należących do krawędzi,
- zaznaczone punkty krawędzi powinny być możliwie blisko jej osi,
- wyłącznie jedna odpowiedź na pojedynczy punkt krawędzi."

Po zapoznaniu się z literaturą związaną z przetwarzaniem obrazów medycznych w algorytmie został użyty operator Canny'ego. Jest on powszechnym i dobrze sprawdzonym rozwiązaniem do wykrywania krawędzi. Jak napisał autor [4] „Operator ten (Canny'ego) jest bardzo popularny, chętnie wykorzystywany i adoptowany do wielu zastosowań. (...) Stał on się również standardem często używanym do porównań innych metod wykrywania krawędzi." Zgodnie z rysunkiem 4.25 „Porównanie operatorów wykrywania krawędzi" w [4] najlepiej wykrywał główne narządy, takie jak wątroba czy też trzustka. Z wyżej wymienionych powodów został on wykorzystany w tym algorytmie.

Operator Canny'ego [5] składa się z 3 zasadniczych kroków:

1. **Określenie wartości i kąta gradientu.**

   W tym celu został wykorzystany operator gradientu, a estymatorem gradientu w funkcji dyskretnej, jaką jest obraz, zastosowano maskę, czy też operator Sobela. Wykorzystując go uzyskano dla każdego piksela wielkość oraz kierunek gradientu, co służy do dalszych obliczeń.

2. **Wykrycie miejsc występowania krawędzi.**

   W tym celu został wykorzystany algorytm non-max suppression. Polega on na wyborze

takich pikseli, które mają największą wartość gradientu na linii o kierunku zgodnym z kątem danego gradientu. Możliwe są 4 kierunki: pionowy, poziomy oraz dwa diagonalne. Jeśli dany piksel miał większą wartość gradientu od dwóch swoich sąsiadów, to zaznaczono go jako potencjalny punkt tworzący krawędzie. W ten sposób otrzymano obraz z potencjalnymi krawędziami.

3. **Wyznaczanie krawędzi progowaniem histerezy**

   Po poprzednim kroku na obrazie nadal znajdują się nieistotne krawędzie. W tym celu Canny wprowadził ideę progowania histerezy. Metoda ta wymaga 2 wartości progowych $T_1, T_2$ takich, że $T_1 < T_2$. Jeżeli wartość gradientu w danym pikselu jest większa od $T_2$, to zaznaczono ten punkt jako krawędź. Jeśli tak się stało, to zaczęto proces śledzenia krawędzi — dla każdego sąsiada, którego wartość gradientu jest większa od $T_1$ zaznaczono go jako krawędź. Jest ona wykonywana rekurencyjnie dla każdego zakwalifikowanego punktu.

   Zamiast dokładnych wartości progowych można przekazać do funkcji 2 wartości — $t_1, t_2$, które są procentem liczby pikseli, które będą niedopuszczone jako krawędzie. Dla $t_1 = 0.7, t_2 = 0.9$ dopuszczono tylko 10% pikseli jako te, które są większe od $T_2$. Podając $t_1, t_2$ wyznaczono rozkład wartości gradientu w badanym obrazie, obliczono dystrybuantę $F(x)$ i wybrano dla $T_1$ ten argument, dla którego $F(x) = t_1 * liczbapikseli$ i analogicznie dla $T_2$. W ten sposób wyznaczono progi do histerezy.

Operator Sobela [6] to metoda wyznaczania gradientu, a więc zarazem krawędzi zarówno w kierunku poziomym, jak i w pionowym. Dla każdego piksela przeprowadzono operację morfologiczną z następującymi maskami:

| Maska rzędów | | | Maska kolumn | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $-1$ | $-2$ | $-1$ | $-1$ | $0$ | $1$ |
| $0$ | $0$ | $0$ | $-2$ | $0$ | $2$ |
| $1$ | $2$ | $1$ | $-1$ | $0$ | $1$ |

Po wykonaniu tych operacji otrzymano wartości $s_1$ i $s_2$ odpowiednio dla maski rzędów i kolumn. Na podstawie tych danych otrzymano następujące informacje o gradiencie:

| Wielkość gradientu | Kierunek krawędzi |
|---|---|
| $\sqrt{s_1^2 + s_2^2}$ | $\tan^{-1}\left[\frac{s_1}{s_2}\right]$ |

Detektory krawędzi oparte na gradiencie, w tym operator Canny'ego są często używane. Ich główne zalety na podstawie [4] to:

- Dają dobre wyniki dla obrazów o dobrej jakości i bez szumów.
- Są wydajne - ich złożoność jest liniowa względem liczby przetwarzanych pikseli.
- Nie wymagają skomplikowanej sztucznej inteligencji do działania.

Zgodnie z [4] za ich główne wady można uznać:

- „Konieczność określenia rozmiaru maski i wartości progowej. Rozmiar maski znacząco wpływa na położenie miejsc, w których gradient przecina zera lub osiąga wartości maksymalne.
- Pomijanie narożników spowodowane faktem, że wartość 1D gradientu w narożnikach jest zazwyczaj mała.
- Operator pierwszej pochodnej wykrywa tylko schodkowe krawędzie.
- Duża wrażliwość na szum."
- Na podstawie obserwacji działania algorytmu - rozmyte krawędzie często nie są wykrywane przez małe różnice w wartościach kolejnych sąsiadujących pikseli.

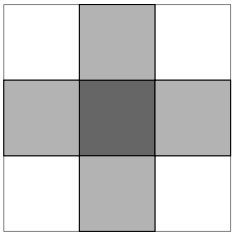
W ten sposób otrzymano macierz, gdzie każde pole w macierzy odpowiada pikselowi w wejściowej bitmapie — obrazie medycznym. Jeśli w komórce macierzy znajduje się 1, to w tym miejscu na bitmapie znajduje się krawędź, w przeciwnym przypadku 0. W ten sposób algorytm wykrył wszystkie znaczące krawędzie na bitmapie. Kolejnym krokiem przetwarzania było stworzenie grafu na podstawie wyżej wymienionej macierzy.

### 3.3.2. Stworzenie grafu z bitmapy

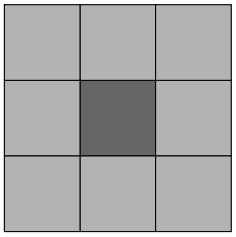
Na tym etapie algorytm potrzebuje następujących danych wejściowych:

- Macierz z wartościami logicznymi prawda/fałsz czy znajduje się w danym punkcie krawędź. Może to być także realizowane poprzez macierz wartości liczbowych.
- Punkty wybrane przez użytkownika aplikacji.

Przed rozpoczęciem działania algorytmu należy zapewnić łączność 4-krotną (ang. Pixel 4-connectivity) [7]. Jest ona zwana także sąsiedztwem von Neumanna. Przy łączności 4-krotnej sprawdza się tylko sąsiadów w poziomie lub pionie.



Dla łączności 8-krotnej sprawdza się wszystkich możliwych sąsiadów, także po przekątnej. Jest ona zwana także sąsiedztwem Moore'a lub otoczeniem Moore'a [8].



W przypadku zastosowania łączności 8-krotnej przy wyznaczaniu długości krawędzi musiano by zastosować metrykę Czebyszewa, która jest specjalnym przypadkiem odległości Minkowskiego. Jeśli zostanie łączność 4-krotna to długość krawędzi byłaby obliczana zgodnie z metryką miejską, zwaną też metryką Manhattan.

Metryka Manhattan w kontekście dalszego przetwarzania w celu wyszukiwania najkrótszych ścieżek w grafie jest bardziej adekwatna, ponieważ jest intuicyjna w wyznaczaniu odległości na obrazie płaskim w porównaniu do metryki Czebyszewa. W tym przypadku najlepsza byłaby tutaj metryka Euklidesa, lecz mamy do czynienia nie z kolejnymi punktami oddalonymi od siebie, a z sąsiadującymi pikselami. Ponadto w tym algorytmie istotne jest szybkie szacowanie odległości, czy też długości danej krawędzi.

Wykrywanie wierzchołków przy łączności 4-krotnej jest prostsze. Wystarczy zliczyć liczbę sąsiadów. Poniżej zakładamy, że piksel jest oznaczony jako krawędź w macierzy wejściowej. W zależności od liczby sąsiadów mamy następujące przypadki:

- 0 — wierzchołek izolowany,
- 1 — punkty końcowe (ang. endpixels),
- 2 — punkty łączące (ang. linkpixels), czyli fragmenty krawędzi,
- 3–4 — punkty węzłowe (ang. vertices), czyli punkty, od których odchodzą co najmniej 3 krawędzie.

W przypadku łączności 8-krotnej do detekcji wierzchołków należałoby stosować przekształcenia Hit-or-Miss z elementami strukturalnymi. Elementy strukturalne do wykrywania odpowiednich punktów są następujące:

- wierzchołek izolowany:
$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

- punkty końcowe (ang. endpixels):
$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ z & z & z \end{bmatrix},$$
- punkty łączące (ang. linkpixels), czyli fragmenty krawędzi, posiadają dokładnie 2 sąsiadów, nie używamy przekształcenia Hit-or-Miss a tylko liczymy sąsiadów
- punkty węzłowe (ang. vertices), czyli punkty, od których odchodzą co najmniej 3 krawędzie:
$$\begin{bmatrix} z & 1 & z \\ z & 1 & z \\ z & z & 1 \end{bmatrix} \text{ lub } \begin{bmatrix} 1 & z & z \\ z & 1 & z \\ 1 & z & 1 \end{bmatrix},.$$

Warto zauważyć, że te elementy strukturalne należy obracać o 90, 180 i 270 stopni. Za każdym razem potrzeba wielokrotnie sprawdzać te same piksele. Ponadto należy sprawdzać 8, a nie 4 sąsiadów.

Kolejnym problemem jest fakt, że przy spójności 8-krotnej przekształcenie Hit-or-Miss może w najbliższym otoczeniu punktu krzyżowania się krawędzi oznaczyć kilka otaczających punktów, jako punkty węzłowe. Jest to złe rozwiązanie, ponieważ w ten sposób może nawet kilkukrotnie zwiększyć liczbę wierzchołków w grafie, co przełożyłoby się na niską wydajność algorytmu.

Ostatnim problemem z jakim należałoby się wiązać wybierając łączność 8-krotną jest fakt, że macierz wejściową dla tego etapu algorytmu należałby poddać procesowi szkieletyzacji. Najlepiej byłoby w tym celu skorzystać z algorytmu KMM [9] lub K3M [10]. Te algorytmy musiałyby co najmniej raz przejrzeć całą macierz z wykrytymi krawędziami w optymistycznym przypadku.

Z wyżej wymienionych powodów zdecydowano się na łączność 4-krotną. Przygotowano i zaimplementowano algorytm tworzący graf z bitmapy, a jego pseudokod znajduje się poniżej.

```
 1) MATRIX - macierz wejściowa z oznaczonymi krawędziami jako 1
 2) foreach(punkt A taki, że MATRIX(A) == 1)
 3) {
 4)     if ( punkt A ma 1 sąsiada albo co najmniej 3 sąsiadów )
 5)     {
 6)         // (tzn. jest albo punktem końcowym albo węzłowym)
 7)         wstaw punkt A do kolejki wierzchołków L_V
 8)         while ( kolejka wierzchołków L_V niepusta )
 9)         {
10)             weź wierzchołek V_1 z kolejki L_V
```

```
11)             usuń V_1 z kolejki L_V
12)             dodaj wierzchołek V_1 do grafu G
13)             foreach (punkt B sąsiadujący z V_1 )
14)             {
15)                 if ( MATRIX(B) == 1 )
16)                 {
17)                     stwórz nową krawędź E.
18)                     dodaj B do E
19)                     ustaw wierzchołek V_1 jako początek krawędzi E
20)                     dodaj krawędź E do kolejki przetwarzanych krawędzi L_E
21)                 }
22)                 while ( L_E niepusta)
23)                 {
24)                     weź krawędź E z L_E
25)                     usuń E z kolejki
26)                     stwórz kolejkę potencjalnych punktów krawędzi E, L_P
27)                     weź punkt C z E
28)                     usuń C z E
29)                     dodaj punkt C do kolejki L_P
30)                     while ( L_P niepusta )
31)                     {
32)                         weź punkt D z L_P
33)                         usuń D z L_P
34)                         K = liczba sąsiadów D
35)                         if ( K == 0 lub K > 1 )
36)                         {
37)                             stwórz wierzchołek V_2, który znajduje się w D
38)                             do listy krawędzi wierzchołka V_2 dodaj E
39)                             do listy krawędzi wierzchołka V_1 dodaj E
40)                             ustaw wierzchołek V_2 jako koniec krawędzi E
41)                             dodaj krawędź E do grafu G
42)                             dodaj wierzchołek V_2 do kolejki L_V
43)                         }
44)                         if ( K == 1 )
```

```
45)                         {
46)                             dodaj punkt D do E
47)                             foreach ( punkt F sąsiadujący z D )
48)                             {
49)                                 if ( MATRIX(F) == 1)
50)                                 {
51)                                     dodaj F do L_P
52)                                 }
53)                             }
54)                         }
55)                         MATRIX(D) = 1
56)                     }
57)                 }
58)             }
59)         }
60)     }
61) }
62) Zwróć graf G
```

Utworzony w ten sposób graf jest grafem nieskierowanym z wagami, gdzie wagi to liczba pikseli, czy też punktów należących do krawędzi. Graf ten może nie być spójny. Ponadto ten graf może nie zawierać wierzchołków, które pokrywają się z punktami wybranymi przez użytkownika.

Graf ten zazwyczaj jest rzadki, ponieważ liczba jego krawędzi jest rzędu liczby jego wierzchołków. Z uwagi na czasami bardzo dużą liczbę wierzchołków — nawet do kilkudziesięciu tysięcy — próba implementacji przy pomocy macierzy sąsiedztwa mogłaby spowodować zużycie całej możliwej pamięci operacyjnej. Dla 50 tysięcy wierzchołków program musiałby zadeklarować macierz sąsiedztwa zawierającą 2,5 miliarda komórek. Z tych powodów graf został zaimplementowany przy pomocy list sąsiedztwa.

W przyjętej implementacji każda krawędź zawiera dodatkowo informację o tym, jakie piksele należą do danej krawędzi w rzeczywistym obrazie.

### 3.3.3. Zapewnienie spójności grafu

W pierwszym kroku na tym etapie przetwarzania grafu są dodawane punkty wybrane przez użytkownika do grafu.

Graf, który uzyskano w poprzednim kroku może nie być spójny. Powoduje to fakt, że między

punktami wybranymi przez użytkownika mogą nie istnieć ścieżki. W celu zapewnienia spójności grafu należy dodawać sztuczne krawędzie. Zostają one dodawane z większymi wagami, niż wynikałoby to w rzeczywistości z liczebności listy pikseli, które reprezentują, ponieważ ma to na celu używanie z większym priorytetem prawdziwych krawędzi, a nie sztucznych. W sytuacji gdy nie istnieje dobra ścieżka z prawdziwych krawędzi, to zostaną użyte krawędzie sztuczne. Duże wagi dodatkowo będą zmuszały algorytmy wyszukiwania najkrótszych ścieżek w grafie do minimalizowania długości takich fragmentów zawierających sztuczne krawędzie.

Do znajdowania spójnych składowych grafu najczęściej używa się albo algorytmu przeszukiwania grafu w głąb (ang. Depth-first search, w skrócie DFS) lub przeszukiwania grafu wszerz (ang. Breadth-first search, w skrócie BFS) [11]. Użyto algorytmu przeszukiwania wszerz, opierając się na przykładowej implementacji w materiałach [14]. Wykorzystano Queue<T>, a zatem kolejkę, więc jest to przeszukiwanie wszerz. Złożoność obliczeniowa tego algorytmu to $O(|E|)$.

Po wyznaczeniu spójnych składowych grafu dla każdej pary składowych znajdowano taką parę wierzchołków, że odległość między nimi jest minimalna. Jeśli ta odległość była mniejsza niż maksymalna odległość między dwoma dowolnymi punktami zaznaczonymi przez użytkownika, to była dodawana sztuczna krawędź o wadze 2,5 razy większej niż odległość wynikająca z metryki Manhattan pomiędzy tymi dwoma wierzchołkami.

Przykład zasady działania tej operacji przedstawia poniższy pseudokod:

```
1) foreach (Spójna składowa grafu s1)
2) {
3)     foreach (Spójna składowa grafu s2, różna od s1 i nie przetwarzana
       wcześniej jako s1)
4)     {
5)         Wybierz wierzchołek v1 z s1 i v2 z s2 takie, że odległość pomiędzy
           nimi jest najmniejsza ze wszystkich takich par
6)         Dodaj sztuczną krawędź pomiędzy v1 i v2
7)     }
8) }
```

W ten sposób osiągnięto spójny graf, który zawiera punkty dodane przez użytkownika.

### 3.3.4. Wyszukanie najkrótszych ścieżek w grafie

Na tym etapie została zapewniona spójność grafu. Z całą pewnością istnieje ścieżka pomiędzy punktami wybranymi przez użytkownika, te punkty są osiągalne. Pozostało wybrać najkrótszą

ścieżkę łączącą kolejne te punkty. Założono, że jest dana lista punktów wybranych przez użytkownika i zawiera ona kolejne punkty, tzn. pierwszy należy połączyć z drugim, drugi z trzecim, ..., ostatni z pierwszym.

Warto zaznaczyć, że wyszukiwano ścieżki o minimalnej wadze, czy też o minimalnym koszcie. Z uwagi na fakt, że wagi w grafie są ściśle związane z odległościami to używane jest sformułowanie szukania najkrótszych ścieżek. Wagi w tym grafie są nieujemne. Może istnieć w tym grafie kilka ścieżek z jednego punktu do drugiego o tym samym koszcie, więc algorytm kończy swoje działanie na tym etapie, gdy znajdzie jedną z nich. W tym grafie nie występują krawędzie wielokrotne. Ten graf nie zawiera cykli własnych.

Do wyszukiwania najkrótszych ścieżek w grafie po zgłębieniu literatury [11] i [14] były rozważane do użycia 2 algorytmy. Był to algorytm Dijkstry i A*. Do algorytmu A* była rozważana heurystyka w postaci odległości miejskiej, Manhattan z wierzchołka $v$ do celu $t$, ozn. $h(v)$.

Zgodnie z [14] „Funkcja $h$ musi spełniać następujące warunki:

- musi być oszacowaniem dolnym, czyli dla każdego wierzchołka $v$ $h(v)$ <= odległość $v$ od celu $t$,
- musi być monotoniczna, czyli dla dowolnej krawędzi $< u, v >$ $h(u)$ <=waga$< u, v >$ $+h(v)$."

Heurystyka w postaci metryki Manhattan spełnia te wymagania. Z tego powodu może zostać wykorzystany algorytm A*. Porównując złożoności algorytmu A* i Dijkstry w [14] możemy zauważyć, że algorytm A* w pesymistycznym przypadku ma taką samą złożoność jak algorytm Djikstry, czyli $O(|E| * log(|V|))$ z kolejką priorytetową dla grafów rzadkich, a $O(|V|^2)$ nie wykorzystując kolejki priorytetowej dla grafów gęstych. W praktyce dla grafów rzadkich nie ma potrzeby rozważania znacznej części wierzchołków, co poprawia złożoność średnią. Wynosi ona wtedy $O(|E|)$.

Do implementacji wyszukiwania najkrótszych ścieżek w grafie na podstawie wyżej wymienionych wniosków został wykorzystany algorytm A* z heurystyką w postaci metryki Manhattan. Przykładowy pseudokod tego algorytmie można znaleźć w [14] i jest on następujący:

```
1) CLOSE = 0 // zbiór (z szybkim sprawdzeniem przynależności)
2) OPEN = {s} // kolejka priorytetowa
3) // priorytety - sumy odległości wierzchołków od źródła
4) // i oszacowań odległości tych wierzchołków od celu
5) odległość[s] = 0
6) while ( OPEN niepusty )
```

```
 7) {
 8)     u = wierzchołek należący do OPEN taki, że
 9)         odległość[u] + oszacowanie[u,t] <=
10)         odległość[w] + oszacowanie[w,t]
11)         dla wszystkich w należących do OPEN
12)     usuń u z OPEN
13)     wstaw u do CLOSE
14)     if ( u == t ) break
15)     foreach ( wierzchołek w sąsiadujący z u taki, że w należący do CLOSE )
16)     {
17)         if ( w należy do OPEN )
18)         {
19)             odległość[w] = nieskończoność
20)             wstaw w do OPEN
21)         }
22)         if ( odległość[w] > odległość[u] + waga<u,w> )
23)         {
24)             odległość[w] = odległość[u] + waga<u,w>
25)             aktualizacja priorytetu wierzchołka w (w OPEN)
26)             poprzedni[w] = u
27)         }
28)     }
29) }
```

Aby maksymalnie dobrze wykorzystać niską złożoność obliczeniową algorytmu A* należało wykorzystać dobre struktury danych do tego algorytmu. Zbiór CLOSE wymagał szybkiego sprawdzania przynależności. Po przenalizowaniu rekomendowanych struktur danych [15] został użyty HashSet<T>.

Zbiór Open oferował zastosowanie znacznie bardziej finezyjnych struktur danych. Wymagane było od niego, aby był kolejką priorytetową, czyli aby był sortowany po priorytetach będącymi sumą odległości wierzchołków od źródła i oszacowań odległości tych wierzchołków od celu. Warto zauważyć, że oprócz sortowania często są wstawiane do niego wierzchołki, pobierane, usuwane i modyfikowane wartości priorytetu. Bardzo często jest sprawdzana przynależność i jest wyszukiwanie według klucza.

W [12] na stronie 317 znajduje się tabela 7.1. Przedstawia ona porównanie czasów różnych

operacji dla różnych klas słownikowych zaimplementowanych w technologii .NET. Najlepszą strukturą danych byłoby SortedDictionary<K,V>, która jest implementowana przez drzewo czerwono-czarne gdyby nie fakt, że jest sortowane po kluczu, a nie tak jak jest potrzebne w tym przypadku sortowanie po wartości. Poszukiwano zatem struktury danych, która sortuje po wartościach i ma łatwy dostęp przez klucz.

W naszym rozwiązaniu została zaimplementowana struktura danych opierająca się na dwóch podstrukturach - zaimplementowanej kolejki priorytetowej poprzez listę, oraz słownik Dictionary<K,V> z technologii .NET, który opiera się o Tablicę skrótów. Zaimplementowana lista miała następującą strukturę:

```
public class MySortedListElement
{
    public Vertex Key;
    public double Value;
    public MySortedListElement next;
    public MySortedListElement previous;
}
```

Struktura ta miała zaimplementowane sortowanie przez wstawianie, zatem modyfikacja tylko jednego elementu wymagała w pesymistycznym przypadku tylko $O(n)$ porównań. Wstawianie nowego elementu ma złożoność pesymistyczną $O(n)$, usuwanie $O(1)$. Zbadanie przynależności po kluczu to $O(n)$ i nie zaleca się tego robić.

Niezależnie od tej struktury jest przechowywana druga struktura danych, Dictionary<K,V>, gdzie kluczami są wierzchołki, a wartości to referencje na elementy tej listy. Zmienne odpowiedzialne za przechowanie kolejki priorytetowej OPEN zostały zadeklarowane w sposób następujący:

```
Dictionary<Vertex, MySortedListElement> OpenDictionary =
   new Dictionary<Vertex, MySortedListElement>();
MySortedList OpenList = new MySortedList();
```

W ten sposób w połączeniu tych dwóch podstruktur otrzymujemy strukturę danych o następujących własnościach:

- dodawanie w czasie $O(n)$,
- wyszukiwanie po kluczu w czasie $O(1)$,
- wybierz najmniejszy element według wartości w czasie $O(1)$,

- usuwanie w czasie $O(1)$
- modyfikowanie jednego elementu w czasie $O(n)$.

Algorytm A* jest uruchamiany dla każdego punktu wybranego przez użytkownika. Wyszukuje on najkrótszą ścieżkę do kolejnego punktu wybranego przez użytkownika. Po wszystkich obliczeniach obrys składa się z poszczególnych ścieżek. Są one konsolidowane i zwracane jako lista pikseli na podstawie danych z krawędzi o listach pikseli, z których jest zbudowana krawędź. W ten sposób jest wykrywany obrys pomiędzy punktami zaznaczonymi przez użytkownika.

W sytuacji, gdy pomiędzy różnymi wierzchołkami nie istnieją prawdziwe krawędzie, albo istnieją tylko w wybranym fragmencie ścieżki łączącej te dwa wierzchołki, to algorytm w miarę możliwości będzie starał się używać prawdziwych krawędzi, dzięki odpowiedniej wadze krawędzi sztucznych. Dzięki sztucznym krawędziom na pewno istnieje droga między kolejnymi punktami, zatem algorytm z całą pewnością zwróci poprawny wynik. Co najwyżej będzie to wielokąt z punktami wybranymi przez użytkownika.

Algorytm dla sztucznych krawędzi generuje listę pikseli algorytmem Bresenhama [16]. Jest to algorytm, który dodaje w najbardziej optymalny sposób krawędzie. W celu zapewnienia łączności 4-krotnej jest przeprowadzana operacja morfologiczna z wykrywaniem 2 pikseli po przekątnej z maską 4-pikselową. Gdy zostaną takie piksele wykryte, to na jednym z rogów jest dodawany piksel w celu zapewnienia łączności 4-krotnej.

### 3.3.5. Optymalizacja

Większość plików medycznych ma rozdzielczości rzędu kilkaset na kilkaset pikseli, a więc na całym obrazie znajduje się kilkaset tysięcy pikseli. Zdarzają się też pliki w znacznie większej rozdzielczości, a takimi jest między innymi mammografia i zdjęcie rentgenowskie. Na tych obrazach znajduje się do kilkudziesięciu milionów pikseli. W celu sprawnego przetwarzania tych informacji potrzebne były optymalizacje do algorytmu. Zostały dodane następujące usprawnienia:

1. **Zmniejszenie rozmiaru obrazu roboczego**

   W pierwszym kroku zmniejszono rozmiar obrazu roboczego. Wyznaczono najmniejszy prostokąt, w którym mieszczą się wszystkie punkty zaznaczone przez użytkownika. Powiększono ten prostokąt o marginesy w taki sposób, by wyjściowy prostokąt nadal był w środku, a pole powiększonego było 4-krotnie większe. Innymi słowami — dodano marginesy po 50% szerokości / wysokości do każdego wymiaru. Jeśli rozmiar powiększonego prostokąta jest większe niż obrazu, to nie jest zmieniany obraz roboczy. Optymalizując w ten sposób w sytuacji, gdy użytkownik stworzył mały obrys, to rozmiar przetwarzanego obrazu od momentu operatora Sobela jest już najczęściej kilkukrotnie mniejszy, czasami nawet kilka-

dziesiąt razy. W sytuacji, gdy obrys zajmuje prawie cały obraz medyczny, to nadal musi być przetwarzany cały obraz.

2. **Sięganie do pamięci zamiast to bitmapy**

   W celu przyśpieszenia działania operatora Sobela i liczenia statystyk zamiast sięgać do bitmapy metodą .GetPixel() na platformie .NET bitmapa została zapisana do tablicy bajtów i był z niej bezpośredni dostęp. Została wykorzystana do tego funkcja .LockBits(). Zysk na tej operacji był kilkudziesięciokrotny. Na późniejszych etapach algorytmu pracowano na macierzy, która nie była już bitmapą, więc operacje te wykonywały się znacznie szybciej.

3. **Dzielenie zbyt długich krawędzi**

   W sytuacji, gdy wczytane krawędzie do grafu są bardzo długie, to może zdarzyć się taka sytuacja, że punkt zaznaczony przez użytkownika znajduje się bardzo blisko krawędzi, ale daleko od punktu początkowego lub końcowego krawędzi. W tym celu jest wprowadzony mechanizm dzielenia zbyt długich krawędzi na kilka krótszych.

4. **Problem z ilością punktów**

   Dla każdego punktu jest uruchamiany algorytm A*, zatem w sposób liniowy od ilości punktów zależy liczba uruchomień algorytmu A*. Nie można wyznaczyć, czy w złożoności średniej całego algorytmu algorytm jest zależny liniowo od ilości punktów, czy w sposób logarytmiczny, czy też w sposób stały.

## 3.4. Moduł obliczeń statystyk

Nasz system zapewnia liczenie statystyk dotyczących obrysu. Statystyki są identyczne zarówno dla obrysów manualnych i półautomatycznych. Następujące statystyki są prezentowane użytkownikowi:

- Histogram,
  - Wartość maksymalna,
  - Wartość minimalna,
  - Wartość średnia,
- Środek ciężkości,
- Długość obrysu w $mm$,
- Długość obrysu w pikselach,
- Pole powierzchni w $mm^2$,

- Liczba pikseli wewnątrz obrysu.

Do obliczenia histogramu jest wymagany punkt wewnętrzny obrysu. Środek ciężkości obrysu nie zawsze musi znajdować się wewnątrz obrysu. W przypadku zastosowania algorytmu scan-linii dla obrysu manualnego nie jest dana informacja o logicznych wartościach, gdzie jest krawędź, więc nie można wykryć np. krawędzi poziomych. Algorytm scan-linii lepiej nadaje się w przypadku, gdy wypełniamy wielokąt, a nie obrys.

Z tego powodu wybrano algorytm Flood Fill, czyli rozlewania się rekurencyjnego zliczonych pikseli od punktu wewnętrznego. Właśnie z tego powodu od użytkownika jest wymagane podanie dodatkowej informacji, jaką jest punkt wewnętrzny obrysu. Założono, że użytkownik zaznaczy go poprawnie. W sytuacji, gdy zostanie podany błędny punkt to ten algorytm policzy to co znajduje się na zewnątrz obrysu, a nie to co jest wewnątrz.

# 4. Przeprowadzone eksperymenty

## 4.1. Zbiór testowy

## 4.2. Wydajność algorytmu półautomatycznego

## 4.3. Analiza wyników i wnioski

# 5. Podsumowanie

W tym rozdziale przedstawiono trudności napotkane w trakcie tworzenia sytemu jak również omówiono możliwe drogi dalszego rozwoju systemu.

## 5.1. Napotkane problemy i ograniczenia

### 5.1.1. Problemy związane z interfejsem

W interfejsie ograniczeniem okazał się dostępny rozmiar ekranu. Projektowanie aplikacji zakładało wykorzystanie ekranu o rozdzielczości 1920x1080, a więc ekranu panoramicznego. Niestety obrazy DICOM mają bardzo zróżnicowane układy — są obrazy kwadratowe, pionowe oraz poziome. Założenie, że ekran użytkownika jest ekranem 1920x1080 sprawia, że obrazy pionowe będą wyświetlane jedynie w niewielkiej części obszaru przeznaczonego dla obrazów. Jest to niestety ograniczenie, którego nie da się zlikwidować, gdyż przy założeniu rozdzielczości 1080x1920 powoduje analogiczny problem z obrazami poziomymi. Zaleca się skonfigurowanie aplikacji pod wymagania konkretnej grupy lekarzy lub szpitala na podstawie wymiarów zdjęć, które będą częściej występować w systemie.

### 5.1.2. Integracja między modułami

Podstawowym problemem występującym w trakcie implementacji rozwiązania było ustalanie kontraktów w warstwie komunikacyjnej. Ze względu na niewielką ilość akcji w komunikacji nie zdecydowano się na zastosowanie generatora kontraktów, ale zaleca się wprowadzenie takiego rozwiązania ponownie w trakcie rozwoju systemu. W zależności od złożoności komunikacji generator kontraktów może zdecydowanie usprawnić wprowadzanie zmian w aplikacji.

### 5.1.3. Wymary rzeczywiste obrazów DICOM a rozmiary obrysów

Podczas projektowania systemu zdecydowano, że obrazy DICOM będą wyświetlane w największej rozdzielczości umożliwiającej wyświetlenie całego obrazu na ekranie. W związku z tym, większość obrazów wyświetlona jest w rozmiarze różnym od faktycznego rozmiaru obrazu. Roz-

ważano dwie możliwości rozdzielczości wykonywanych obrysów: faktyczne wymiary obrazu oraz rozmiary obrazu wyświetlanego na ekranie. Zdecydowano, że obrysy powinny być zapisywane w wymiarach identycznych faktycznym rozmiarom obrazu. Decyzja została uzasadniona potrzebą zapewnienia poprawnego obliczania statystyk. Zapisywanie obrysów w takich wymiarach ułatwia obliczanie liczby pikseli wewnątrz obrysu.

#### 5.1.4. Wydajność wyznaczania obrysu półautomatycznego dla obrazów dużej rozdzielczości

Ze względu na złożoność algorytmu używanego do wyznaczania obrysu półautomatycznego wykonywanie obrysów półautomatycznych w obrazach o dużej rozdzielczości przekracza dwukrotnie dopuszczalny czas ustalony w punkcie 5 wymagań niefunkcjonalnych. Czas obliczeń można poprawić poprzez ograniczenie obszaru, w którym wykrywane będą krawędzie, ale nie rozwiąże to problemu z wykonywaniem obrysów o wymiarach zbliżonych do pełnych wymiarów obrazu

### 5.2. Możliwości dalszego rozwoju

#### 5.2.1. Poszerzenie modułu statystyk obrysu

W obecnej wersji systemu nie zaimplementowano deskryptorów kształtu obrysu. Zaimplementowanie takich deskryptorów mogłoby dostarczyć dodatkowe informacje na temat wykonanych przez użytkownika obrysów. Taka informacja może w przyszłości dostarczyć dodatkową zmienną, którą można by wykorzystywać w celu trenowania sztucznej inteligencji w zautomatyzowanym wykrywaniu organów, jak również wykrywaniu i sugerowaniu niepokojących zmian.

#### 5.2.2. Wprowadzenie uwierzytelniania

W tej wersji w systemie użytkownicy nie są rozróżnialni. Dodanie użytkowników pozwoliłoby na segregowanie tworzonych obrysów i wyświetlanie użytkownikowi obrysów wykonanych jedynie przez niego samego, a nie wszystkich obrysów istniejących w systemie. Z punktu widzenia użyteczności systemu użytkownik nie musiałby szukać swojego obrysu pośród obrysu innych użytkowników systemu.

Uwierzytelnianie zapobiegłoby również niepowołanemu dostępowi osób postronnych do wykonanych obrysów oraz uniemożliwiłoby ataki typu DoS. W obecnej wersji można poprzez wysyłanie dużej liczby zapytań związanych z generowaniem obrysów półautomatycznych doprowadzić do niedostępności przeprowadzania akcji na serwerze. System jest również podatny na złośliwe

działanie mające na celu zapełnienie całej dostępnej serwerowi przestrzeni dyskowej, które może zostać wywołane przez wysłanie dużej liczby zapisów obrysów manualnych.

### 5.2.3. Interfejs eksportowania statystyk dotyczących wykonanych w danej sesji obrysów

Z punktu widzenia użytkownika interesujące mogą być informacje wyliczone przez system na temat wykonanych przez niego obrysów. W obecnej wersji systemu, jeśli użyktownik chciałby takie informacje zapisać musiałby samodzielnie przepisać dane wyświetlane w widoku szczegółów obrysu. Zautomatyzowanie takiej funkcjonalności mogłoby zaoszczędzić użytkownikowi wiele czasu.

### 5.2.4. Wykrywanie zmian na podstawie obrysów metodami sztucznej inteligencji

Głównym celem wykonywania obrysów na obrazach medycznym jest generowanie zbioru testowego dla różnych metod sztucznej inteligencji mających na celu sugerowanie lekarzom niepokojących zmian wykrytych automatycznie. W związku z tym użytecznym rozszerzeniem funkcjonalności systemu byłoby zintegrowanie go z modułem sztucznej inteligencji i umożliwienie obrysowywania wgrywanych obrazów metodami sztucznej inteligencji opartych na obrysach wykonanych przez użytkownika.

# Bibliografia


[1] Nowacki R., Plechawska-Wójcik M.: Analiza porównawcza narzędzi do budowania aplikacji Single Page Application — AngularJS, ReactJS, Ember.js, *Journal of Computer Sciences Institute 2, Politechnika Lubelska, Instytut Informatyki*, Lublin, 2016, 98–103

[2] Microsoft Corporation: Dokumentacja platformy .NET. Oficjalna strona: https://docs.microsoft.com/pl-pl/dotnet/ [Dostęp 22 stycznia 2019]

[3] Microsoft Corporation: Informacje o platformie .NET Core. Oficialna strona: https://docs.microsoft.com/pl-pl/dotnet/core/about [Dostęp 22 stycznia 2019]

[4] Kronis K., Uhanova M.: Performance Comparision of Java EE and ASP.NET Core Technologies for Web API Developmnet. *Applied Computer Systems 23, Riga Technical University*, Ryga, 2018, 37–44

[4] Cytowski J., Gielecki J., Gola A.: Cyfrowe przetwarzanie obrazów medycznych: Algorytmy. Technologie. Zastosowania. *Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT*, Warszawa, 2008, 88–94.

[5] Canny J. F.: Finding Edges and Lines in Images. *Technical report no. 720, Massachusetts Institute of Technology (MIT)*, Cambridge, Massachusetts, USA, 1983.

[6] Sobel I., Feldman G.: An 3x3 Isotropic Image Gradient Operator for Image Processing. *Presentation at Stanford Aartificial Intelligence Project (SAIL) in 1968*, 2014

[7] Rosenfeld A., Kak A. C.: Digital Picture Processing, *Academic Press, Inc.*, Nowy Jork, 1982

[8] Weisstein, Eric W.: Moore Neighborhood. *From MathWorld–A Wolfram Web Resource.* http://mathworld.wolfram.com/MooreNeighborhood.html [Dostęp 22 stycznia 2019]

[9] Saeed K., Rybnik M., Tabędzki M., Adamski M.: Algorytm do Ścieniania Obrazów: Implementacja i Zastosowania *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej 2002 Informatyka - Zeszyt 1*, Białystok, 2002

[10] Saeed K., Tabędzki M., Rybnik M., Adamski M.: K3M: A Universal Algorithm for Image Skeletonization and a Review of Thinning Techniques *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2010, 20(2)* Białystok, 2010, 317–335

[11] Sedgewick R., Wayne K.: Algorytmy Wydanie IV, *Helion*, Gliwice, 2012, 526–706

[12] Albahari J., Albahari B.: C 6.0 w pigułce, *Helion, O'Reilly Media, Inc.*,Gliwice, 2016, page–page

[13] Hart P. E., Nilsson N. J., Raphael B.: A Formal Basis for the Heurestic Determination of Minimum Cost Paths *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics 4(2)*, 1968, 100–107

[14] Bródka J.: Wykłady z przedmiotu Algorytmy i Struktury Danych 2 *Politechnika Warszawska, Wydział Matematyki i Nauk Informacyjnych* Materiały dostepne na stronie: http://mini.pw.edu.pl/ brodka/ASD2.html [Dostęp 22 stycznia 2019]

[15] Microsoft Corporation: Dokumentacja rekomendowanych struktur danych platformy .NET. Oficjalna strona: https://docs.microsoft.com/pl-pl/dotnet/standard/collections/ [Dostęp 22 stycznia 2019]

[16] Bresenham J. E.: Algorithm for computer control of a digital plotter. *ICM System Journal 4(1)* 1965

[17] Microsoft Corporation: Informacje o platformie ASP.NET Core. Oficialna strona: https://docs.microsoft.com/pl-pl/aspnet/core/?view=aspnetcore-2.2 [Dostęp 22 stycznia 2019]

## Instrukcja instalacji

W celu instalacji serwera Orthanc należy udać się na stronę `https://www.orthanc-server.com/download.php`, pobrać wersję odpowiednią dla używanego systemu operacyjnego, a następnie postępować zgodnie z instrukcjami wyświetlanymi podczas instalacji. W celu uzyskania szczegółowych informacji odnośnie konfiguracji należy zapoznać się z dokumentacją znajdującą się na stronie `http://book.orthanc-server.com/users/cookbook.html`

W celu instalacji serwera obrysów i aplikacji przeglądarkowej należy skopiować pliki znajdujące się na płycie w folderach Web oraz DotNetProject na stację na której aplikacje te zostaną uruchomione.

Do działania serwera obrysów wymagany jest .NET Core w wersji 2.2 lub nowszej. Aby zainstalować .NET Core należy udać się na stronę `https://dotnet.microsoft.com/download`, pobrać wersję odpowiednią dla używanego systemu operacyjnego, a następnie postępować zgodnie z informacjami wyświetlanymi w trakcie instalacji.

KONFIGURACJA PORTÓW W SERWERZE

Aby uruchomić serwer obrysów należy przejść do skopiowanego folderu DotNetProject/API i wykonać w konsoli polecenie `$ dotnet build && dotnet run`.

Do działania aplikacji przeglądarkowej wymagany jest Node w wersji co najmniej 9.4 oraz yarn w wersji co najmniej 1.10.1. Aby zainstalować Node.js należy udać się na stronę `https://nodejs.org/en/download/` i wybrać wersję odpowiadającą systemowi z którego korzystamy. Postępować zgodnie ze wskazówkami instalatora. W celu instalacji yarn należy udać się na stronę https://yarnpkg.com/en/docs/install aby pobrać wersję odpowiadającą systemowi na którym będzie uruchamiana aplikacja i uruchomić instalator.

W celu konfiguracji portu na który będzie wystawiona aplikacja webowa należy ustawić odpowiednią liczbę w 4 linii pliku Web/express.js. Przykładowa poprawna konfiguracja:

```
$ const portNumber = 3000;
```

Ponadto w celu konfiguracji aplikacji należy ustawić adresy do API serwera obrysów i serwera Orthanc w pliku Web/src/helpers/requestHelper.ts poprzez zmianę zawartości cudzysłowów w pierwszych dwóch linijkach pliku. Przykładowa poprawna konfiguracja:

```
export const orthancURL = "http://localhost:8042/";
```

```
export const apiURL = "https://localhost:5001/";
```

W celu uruchomienia aplikacji przeglądarkowej wchodzimy do folderu Web w którym wykonujemy polecenie `$ yarn install && yarn prod`. Uwaga, tę komendę należy uruchomić w konsoli obsługującej skrypty w języku bash.

## Instrukcja użytkowania

## Wykaz symboli i skrótów

| | |
|---|---|
| API | ang. Application Programming Interface |
| CRUD | ang. Create, Read, Update, Delete |
| CSV | ang. Comma-Separated Values (w pracy użyte w kontekście formatu pliku) |
| DoS | ang. Denial of Service |
| DICOM | ang. Digital Imaging and Communications in Medicine |
| HTML5 | ang. HyperText Markup Language 5 |
| HTTP | ang. Hypertext Transfer Protocol |
| HTTPS | ang. Hypertex Transfer Protocol Secure |
| ID | ang. User Identifier |
| JSON | ang. JavaScript Object Notation |
| REST | ang. Representational State Transfer |
| RGB | ang. Red, Green, Blue |
| SDK | ang. Software Development Kit |

## Spis zawartości załączonej płyty CD

## Spis załączników

1. Załącznik 1
2. Załącznik 2
3. Jak nie występują, usunąć rozdział.